



## 钛/铝复合板感应加热异温轧制 有限元模拟和实验

谢红飙, 陈楠, 梁树杰, 于济瑞, 余超, 肖宏

(燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 秦皇岛 066004)

**摘要:** 为解决钛/铝复合轧制时变形不协调问题, 对电磁感应加热和轧制过程进行了实验, 实现了钛、铝两金属在温差约 600 °C 以上的条件下轧制复合, 并通过有限元模拟研究了板坯温度和压下率对钛/铝复合板的变形协调性能和结合强度的影响。结果表明: 当钛板加热温度为 850 °C、压下率在 30%~48% 范围内时, 随着钛板加热温度升高和压下率的增加, 钛板和铝板的变形协调性得到较大改善。当钛板温度为 850 °C、轧制压下率为 48% 时, 复合板结合强度达到 77 MPa。

**关键词:** 钛/铝复合板; 感应加热; 轧制复合; 协调变形; 结合强度

文章编号: 1004-0609(2022)-08-2231-12

中图分类号: TG335.81

文献标志码: A

**引文格式:** 谢红飙, 陈楠, 梁树杰, 等. 钛/铝复合板感应加热异温轧制有限元模拟和实验[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2231-2242. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42023

XIE Hong-biao, CHEN Nan, LIANG Shu-jie, et al. Finite element simulation and experiment of induction heating heterothermal rolling of Ti/Al composite plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8): 2231-2242. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42023

钛及其合金具有高强度、低密度、耐腐蚀、抗疲劳等优异性能, 被誉为“太空金属”, 广泛应用于航天、军事以及医学领域<sup>[1]</sup>; 铝具有良好导热性能、耐蚀性且价格低廉, 广泛应用于各种工业领域<sup>[2]</sup>。但是, 钛及其合金价格相对昂贵, 铝及其合金在高温和腐蚀性环境性能大大降低<sup>[3-4]</sup>, 使它们的应用受到一定的限制。钛/铝复合板在保持钛、铝两金属特性的同时具有“互补效应”, 经过恰当组合可以得到优异的综合性能, 而且可以大大降低使用成本<sup>[5]</sup>, 在航空航天、冶金机械、石油化工等领域有更加广阔的使用前景<sup>[6-8]</sup>。

钛/铝复合板的制备方法主要有爆炸复合、固液铸轧法和轧制复合等<sup>[9]</sup>。范敏郁等<sup>[10]</sup>采用岩石粉

乳化炸药进行爆炸复合, 成功制备钛/铝/钛复合层板, 并研究了其界面特征和弯曲性能。但爆炸复合产生地震波、噪声和有毒气体, 背离现代工业绿色发展的趋势<sup>[11]</sup>。王文焱等<sup>[12]</sup>采用固液铸轧法制备钛/铝复合板并分析力学性能和界面组织结构。固液铸轧过程中复杂的传热与流动问题以及对浇注温度和铸轧速度的控制等问题仍然亟待解决<sup>[13]</sup>。轧制复合法通过轧辊施加压力使金属板坯发生塑性变形, 内部新鲜金属流出并在强大的压力作用下形成冶金结合<sup>[14-15]</sup>, 相比于爆炸复合法和固液铸轧法, 轧制复合法生产的产品尺寸精度高、复合后的各层材料厚度均匀、复合材料性能一致性好、生产连续性好, 有利于大规模生产和自动化的实现<sup>[16-17]</sup>。但

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52075472, 52004242); 国家重点研发计划资助项目(2018YFA0707300); 河北省自然科学基金资助项目(E2020203001)

**收稿日期:** 2021-07-14; **修订日期:** 2021-10-18

**通信作者:** 余超, 讲师, 博士; 电话: 15232328011; E-mail: yuc@ysu.edu.cn

是轧制制备钛/铝复合板还存在一定的困难,一是轧制制备得到的复合板强度偏低,二是由于钛、铝金属的变形抗力差异较大,制备得到的复合板两金属变形不协调,板材翘曲严重,轧后层厚比难以控制<sup>[18]</sup>。PENG等<sup>[19]</sup>采用冷轧方法制备钛/铝复合板,并进行515℃、12h退火处理,结合强度达到最大值40MPa,当退火时间继续增加时,界面结合强度降低。MA等<sup>[20]</sup>热轧制备铝/钛/铝叠层复合板时,钛和铝金属变形协调性随加热温度升高变差。为解决钛/铝轧制变形不协调问题,XIAO等<sup>[21]</sup>将单独加热至800℃的钛板与室温铝板叠放后轧制复合,在异温条件下进行轧制,提高了钛和铝变形协调性,得到了较高结合强度的钛/铝复合板。钛板薄,散热快,需要将钛板放置在钢板上并一起加热,从出炉到轧制前,钢板对钛板具有传热保温作用。该方法操作复杂,而且钛板表面氧化严重,氧化层厚度达到5μm。QI等<sup>[22]</sup>在此基础上,通过“铝/钛/分离剂/纯铁/分离剂/钛/铝”的组坯方式,利用纯铁的聚磁效应—在交变磁场中能迅速加热至居里点770℃,通过纯铁板传热使铝钛可以形成305℃的温差,从而减小钛、铝变形抗力差。轧后的坯料从隔离剂处分离,得到两块钛/铝复合板。但该组坯方式工艺复杂,而且会造成纯铁板的浪费,不利于工业化生产。

由于钛、铝两金属的电阻率、比热容等材料属性存在较大的差异,如果对钛/铝同时进行电磁感应加热必然会产生温差。为此本文采用有限元法对钛/铝电磁感应加热过程进行了模拟,分析了电磁感应加热参数的影响规律,设计了电磁感应加热装置,并进行了钛/铝电磁感应异温加热和轧制复合的实验研究,分析了加热温度和轧制压下率对复合强度的影响。

## 1 感应加热有限元模拟和实验

### 1.1 电磁感应异温加热方案设计

由于本研究希望对钛/铝复合板坯进行电磁感应加热时,在钛板和铝板之间产生温差,使钛板的温度明显高于铝板。如采用纵向磁通感应加热,即复合板坯置于螺旋状线圈之中,感应线圈的磁力线

大部分不能穿过板材,这将导致纵向磁通加热板材效率降低,甚至出现不能将板材加热到指定温度的情况,这种情况随着板材变薄会更加严重。为了提高加热效率,加热板材时通常采用横向磁通感应加热装置,即磁力线垂直于板面方向,使大部分磁力线穿过板材,提高加热效率。图1所示为横磁通复合板坯加热装置示意图。由图1可以看出,钛/铝复合板坯置于感应加热线圈之上,且钛板靠近加热线圈。为了防止加热过程中板材表面的氧化,感应加热到轧制的整个过程实现了密封和氩气气体保护。

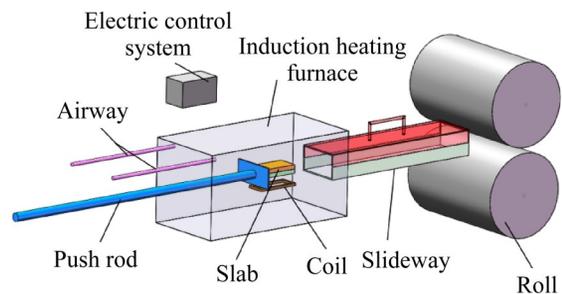


图1 电磁感应异温加热装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic induction heating device at different temperatures

### 1.2 组合板坯感应加热模型

横磁通感应加热磁力线垂直于板面,涡流分布近似为线圈在工件上投影,根据板坯形状采用矩形感应加热线圈,并在线圈中间放置导磁体增加聚磁能力,使板坯中心区域加热温度提高。图2(a)所示为板坯组合方式,钛板和铝板之间放置1mm厚的铝制垫片来减少钛板向铝板的传热。图2(b)所示为感应加热有限元模拟模型,感应加热参数如表1所示。材料参数如表2所示。利用有限元软件ANSYS采用顺序耦合法进行计算,将电磁场计算结果作为温度场的载荷来实现电磁-热耦合分析。

### 1.3 板坯温度场结果

选取加热时间为21s,提取模拟板坯温度分布云图。如图3所示,钛板温度分布在643~849℃之间,铝板温度分布在143~150℃之间,钛板温度远高于铝板温度。由此可见,通过电磁感应加热可以使钛/铝复合板坯内的异种金属之间产生较大的温差。

根据有限元模拟的结果设计了电磁感应加热装置,并进行了相应的实验,用红外热像仪记录不同

时间的板坯温度分布, 为了与感应加热模拟结果进行对比, 选取加热时间为 21 s 的实验结果, 如图 4

所示。对比钛板表面温度分布, 发现温度分布规律与模拟结果基本趋于一致, 板坯四角和中心温度较

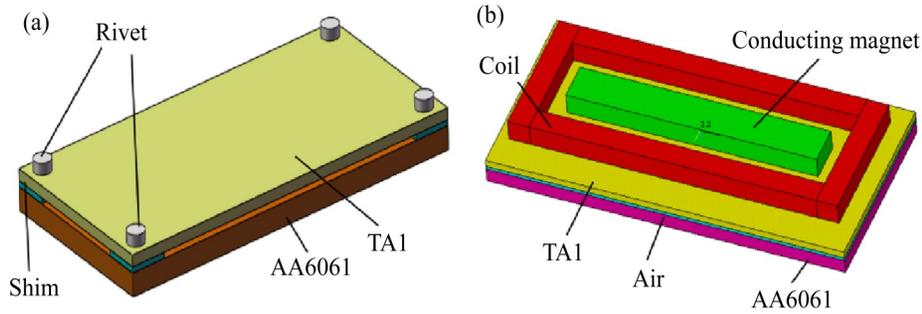


图 2 感应加热模型图

Fig. 2 Schematic diagrams of induction heating model: (a) Slab assembly mode; (b) Induction heating model

表 1 感应加热线圈主要参数

Table 1 Main parameters of induction heating coil

Parameter	Value	Parameter	Value
Size of TA1/mm	100×50×2	Size of coil/mm	92×36×6
Size of AA6061/mm	100×50×4	Cross sectional area of coil/mm	6×6
Size of conducting magnet/mm	80×10×8	Distance of coil and titanium plate/mm	3
Current frequency/Hz	76000	Current density/(A·m <sup>-2</sup> )	2.4×10 <sup>7</sup>

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

Material	Temperature/°C	Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	Poisson ratio	Coefficient of linear expansion/10 <sup>-5</sup> °C	Elastic modulus/GPa	Yield strength/MPa
TA1	700	4550	0.33	1.02	97	115
	800	4550	0.33	1.02	97	55
	900	4550	0.33	1.02	97	31
	950	4550	0.33	1.02	97	20
AA6061	100	2700	0.33	0.17	69	180
	200	2700	0.33	0.4	65	111
	300	2700	0.33	0.7	58	47
	400	2700	0.33	0.95	52	12

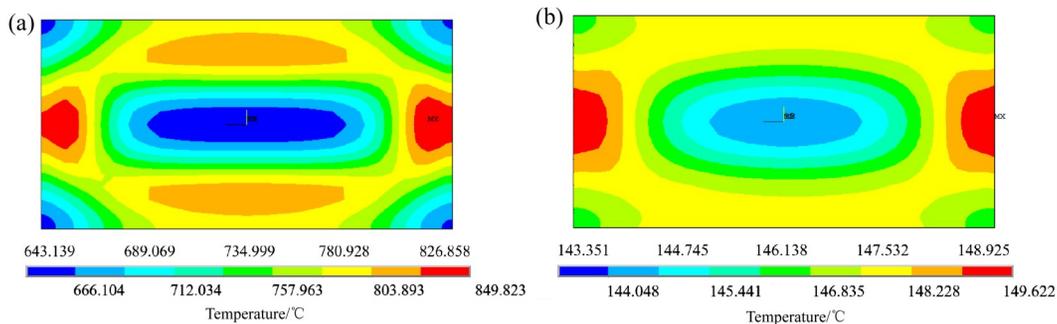


图 3 板坯温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution diagrams of plates in simulation: (a) Titanium plate; (b) Aluminium plate

低,如图4(a)所示;对于铝板,由于其表面辐射率低,表面状态对温度测试结果影响较大,所以将铝板表面喷涂为黑色,表面温度测试结果如图4(b)所示,铝板整个表面除铆钉铆接的地方周围和端部温度略高外,其余位置所测得的温度与模拟结果基本一致。

对于实际电磁感应加热过程,轧件通常在运动过程中进行加热,因此沿宽度方向的温度分布更为重要。图5所示为板坯长度方向中间位置沿宽度方向的温度分布。由图5可知,钛板沿宽度方向的温度存在较大的差异,铝板沿宽度方向的温度分布较为均匀。

图6所示为加热24 s时宽度方向温度分布的模拟结果与实验结果的对比。由图6可知,钛板温度的模拟结果与实验结果基本一致,铝板温度的模拟结果与实验结果相比温度变化趋势有一定的差距,但温度基本相差在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,分析其原因是钛板

和铝板四角用铆钉铆接,在加热过程中板坯受热膨胀,从而钛板和铝板之间距离发生改变,影响铝板的温度分布。

## 2 异温轧制过程有限元模拟

### 2.1 轧制过程模拟模型

采用ANSYS LS-DYNA建立显式动力学有限元模型,首先将板坯电磁感应加热模拟得到的温度场导入轧制模型板坯相应节点上,给板坯一个初速度强制其咬入辊缝中,对于钛板和铝板结合面进行节点耦合,轧制模型如图7(a)所示。在感应加热过程中,由于存在集肤效应,需要保证集肤深度内有足够多的单元数量,同时为了提高计算效率,在划分板坯网格时,对边部网格进行细化,中间部分网格相对较大,采用扫掠法划分网格。在电磁场物理环境中选用SOLID117单元,在温度场环境中选用

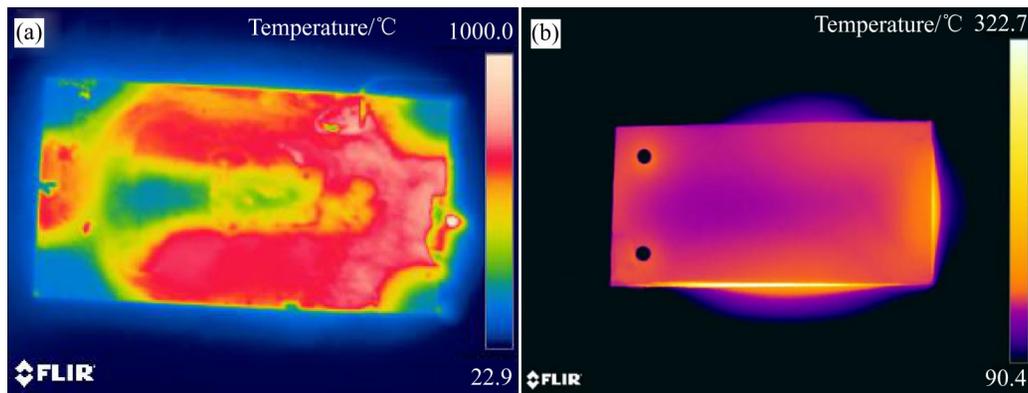


图4 感应加热实验温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution diagrams of plates in induction heating experiment: (a) Titanium plate; (b) Aluminium plate

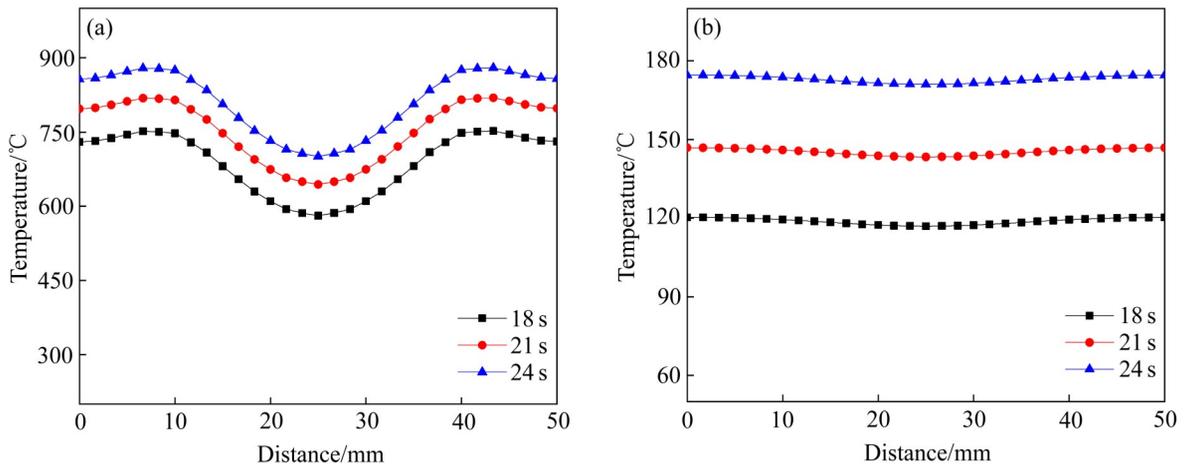


图5 不同时刻板坯宽度方向温度分布曲线

Fig. 5 Temperature distribution curves along plate width of plates at different time: (a) Titanium plate; (b) Aluminium plate

SOLID90 单元, 板坯的网格划分结果如图 7(b) 所示。轧制条件根据实验室二辊轧机的实际情况确定, 轧辊选为刚体。直径和辊身长度均为 200 mm、轧制速度为 500 mm/s、静摩擦因数取 0.35、动摩擦因数取 0.25, 采用不同的加热时间和不同的压下率对异温复合轧制过程进行了模拟。

### 2.2 模拟结果分析

轧制过程复合界面的压应力大小直接影响复合的效果, 有学者认为复合界面的压应力大于两复合金属中难变形金属的屈服强度是轧制复合的条件<sup>[23]</sup>。图 8 所示为加热时间分别为 18 s、21 s、24 s 以及压下率分别为 20%、30%、40% 时轧制过程钛/铝复合界面压应力大于当前温度下钛的屈服强度区域的压应力云图。由图 8 可以看出, 当增加加热时间和轧制压下率时, 压应力大于屈服强度的区域从

中间逐渐向两边扩展。当加热时间 24 s、压下率大于 30% 时, 复合界面宽度方向所有区域的压应力均大于此时钛板屈服强度, 即复合板获得了较好的复合效果。

## 3 异温轧制制备钛/铝复合板

### 3.1 钛铝复合板制备

实验材料选用工业纯钛 TA1 和 AA6061 铝合金, 具体尺寸见表 1, 板材化学成分见表 3 和表 4。实验首先采用砂纸平板打磨机将钛板、铝板的待复合面的杂质和氧化层打磨干净, 再用丙酮和酒精反复擦洗表面除去板材表面的油污, 最后用吹风机吹干。采用图 2(a) 中设计的方式进行组坯, 钛、铝板坯中间放入厚度 1 mm 的铝垫片, 然后将板坯四角用铝铆钉铆接。采用自制的电磁感应加热实验平

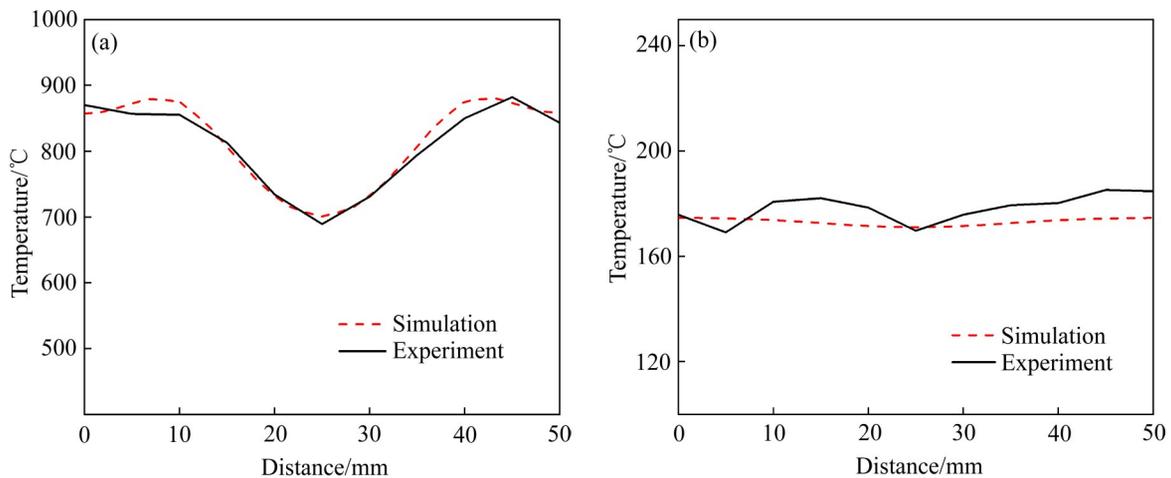


图 6 不同板坯宽度方向温度模拟结果和实验对比

Fig. 6 Temperature simulation and experimental result comparison of different plates along width directions: (a) Titanium plate; (b) Aluminium plate

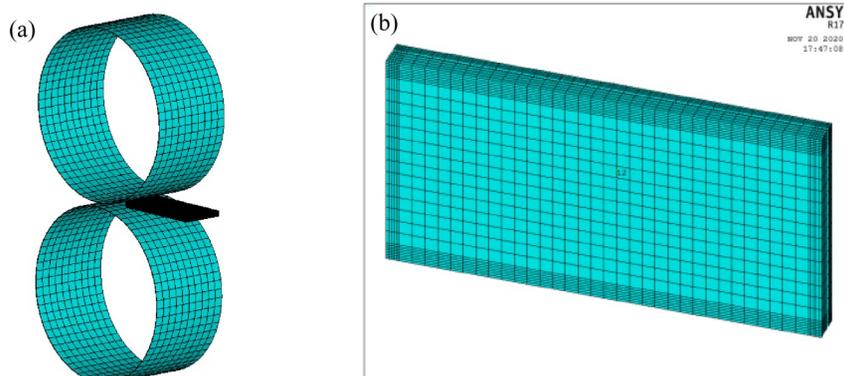


图 7 轧制模型网格划分结果

Fig. 7 Meshing results of rolling model: (a) Rolling model; (b) Slab meshing result

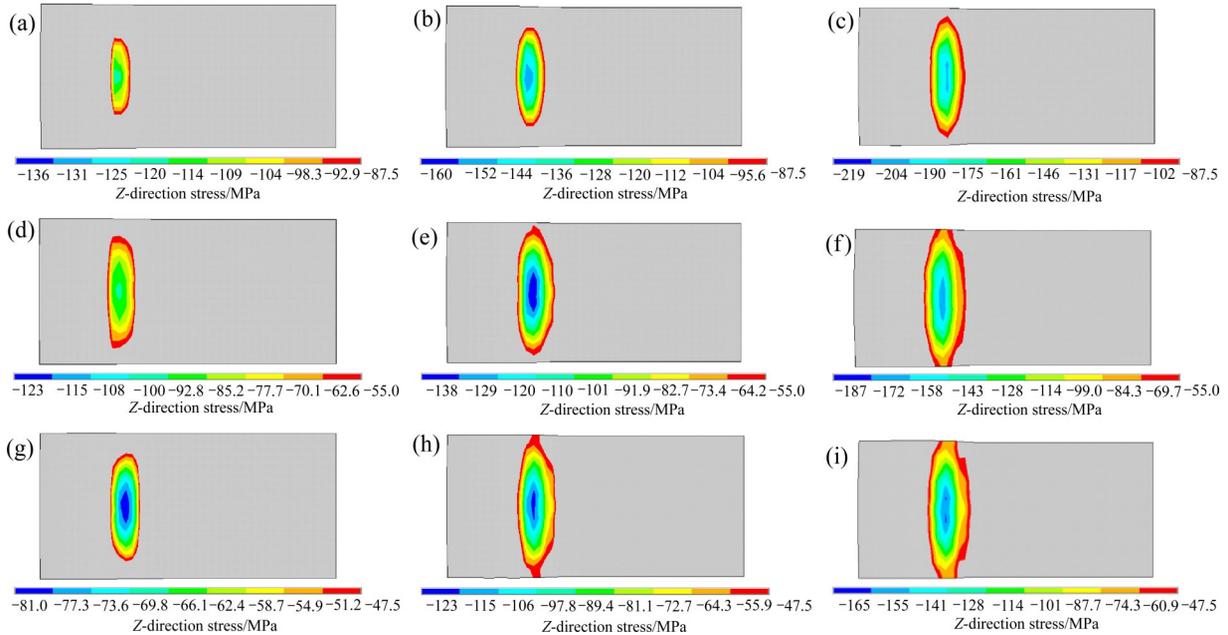


图8 复合界面Z方向压应力云图

Fig. 8 Z-direction stress nephograms of titanium plate interface: (a) Heating for 18 s, 20% reduction; (b) Heating for 18 s, 30% reduction; (c) Heating for 18 s, 40% reduction; (d) Heating for 21 s, 20% reduction; (e) Heating for 21 s, 30% reduction; (f) Heating for 21 s, 40% reduction; (g) Heating for 24 s, 20% reduction; (h) Heating for 24 s, 30% reduction; (i) Heating for 24 s, 40% reduction

表3 纯钛TA1的化学成分

Table 3 Chemical composition of TA1 (mass fraction, %)

Fe	Si	C	N	H	O	Ti
0.15	0.1	0.05	0.03	0.015	0.15	Bal.

表4 铝合金AA6061的化学成分

Table 4 Chemical composition of AA6061 (mass fraction, %)

Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Ti	Al
0.15	0.6	1.2	0.25	0.15	0.2	0.7	0.15	Bal.

台, 将复合板坯分别加热 18 s、21 s 和 24 s, 在不同轧制压下率下进行异温复合轧制, 得到相应轧制条件下的钛铝复合板。

### 3.2 复合板性能测量

轧制完成后从每块复合板上平行于轧制方向切割出六个剪切试样, 在 INSPEKT Table 100 kN 电子万能试验机上进行拉剪试验, 拉剪速率为 1 mm/min, 然后取六个试样的平均值作为该复合板的剪切强度, 拉剪试样如图9所示。平行于轧制方向取金相试样, 先用由粗到细的砂纸依次打磨,

接着用 SiO<sub>2</sub> 悬浊液进行抛光, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察钛/铝复合板结合界面附近和拉剪件断口的微观形貌, 用能量色散谱仪 (EDS) 分析结合界面附近及拉剪件断口的元素分布。

图 10 所示为不同加热时间和不同压下率时钛/铝复合板的界面结合强度。从图 10 可以看出, 钛板的平均温度约为 800 °C 时, 加热 21 s 得到的复合板界面结合强度明显高于加热 18 s 时的结合强度; 而当加热 24 s 时, 复合板界面结合强度与加热 21 s 时基本一致。在压下率小于 40% 时, 结合强度随压

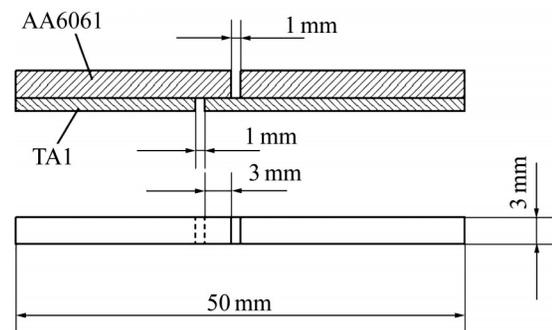


图9 拉剪试样的尺寸示意图

Fig. 9 Schematic diagram of tensile-shear specimen

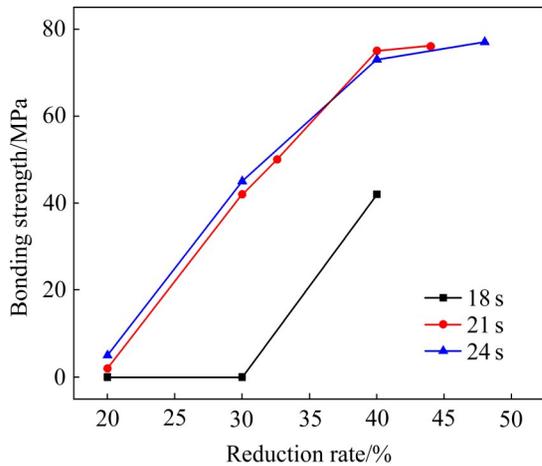


图 10 不同加热时间和压下率时复合板的结合强度

Fig. 10 Bonding strength of composite board at different heating time and reduction rate

下率增加近似呈线性增加; 而当压下率大于 40% 时, 界面结合强度增加趋势变缓, 复合板结合强度达到最高 77 MPa。随着温度的升高及压下率的增大, 复合板的剪切强度增大, 说明复合效果更好, 这也从侧面验证了图 8 中的模拟结果。

### 3.3 复合板微观形貌

为了分析轧制条件对界面结合强度的影响, 以加热 24 s、压下率 30%、40%、48% 时为例, 对其复合界面进行 SEM 和 EDS 线扫描分析, 其结果如图 11 所示。由图 11 可知, 三种复合轧制条件下, 界面复合良好, 元素扩散深度分别为 1.268  $\mu\text{m}$ 、1.400  $\mu\text{m}$  和 1.880  $\mu\text{m}$ , 随着压下率的增加元素扩散深度增加, 复合强度提高。同样对上述三种压下率的轧制复合板, 进行了剪切断口的 SEM 和 EDS 面扫描分析, 结果如图 12 所示。当压下量为 30% 时, 断面表面呈现出裂纹, 面扫描结果如图 12(a') 所示, 铝金属含量占 30.1%, 形成的冶金结合区区域小, 此时断裂为脆性断裂; 当压下量为 40% 时, 钛侧断面出现因拉剪断裂而产生的韧窝, 面扫描结果如图 12(b') 所示, 相比 30% 压下断面表面黏结更多的铝, 此时铝金属含量为 47.4%, 因此, 具有更高的强度, 此时韧窝区的断裂为韧性断裂; 而当压下率为 48% 时, 钛侧断面表面呈现出因拉剪而残留的大面积的金属铝, 如图 12(c') 所示, 通过 EDS 面扫描发现钛侧断面表面覆盖了 83.1% 的铝金属, 这证

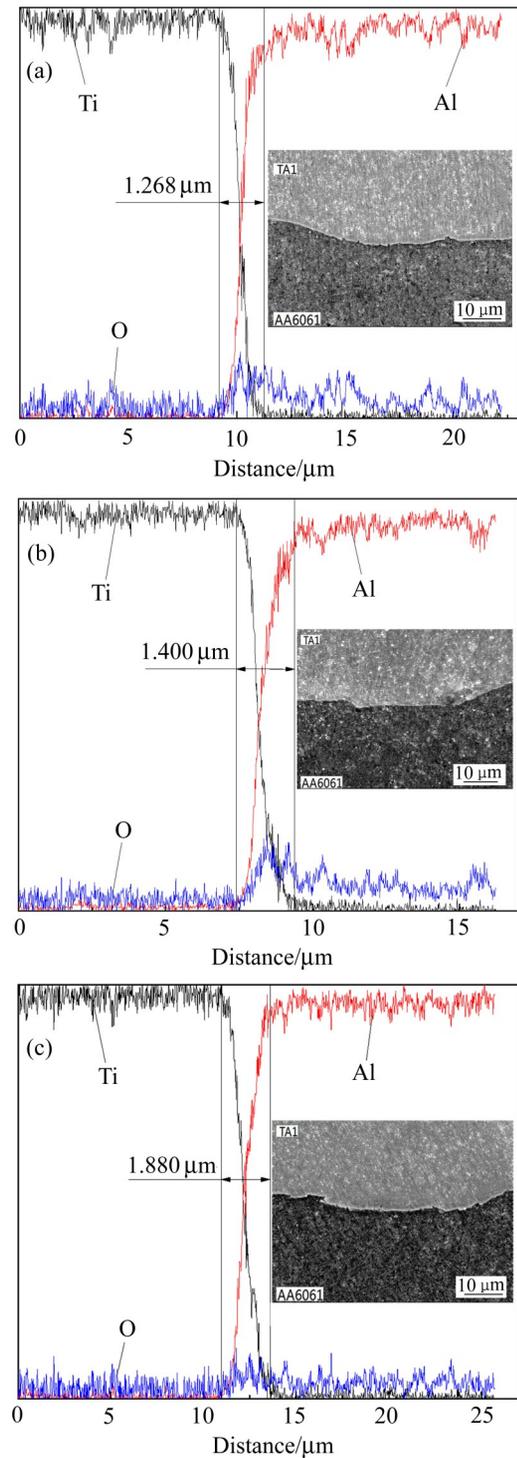


图 11 钛/铝复合界面 EDS 线扫描和 SEM 像

Fig. 11 EDS line scanning and SEM images of titanium/aluminum composite interface: (a) 24 s, 30% reduction; (b) 24 s, 40% reduction; (c) 24 s, 48% reduction

明此时钛铝两金属已经形成牢固的冶金结合, 导致在拉剪实验中断裂发生在铝基体一侧, 此时几乎整个结合面的断裂均为韧性断裂。根据薄膜理论, 在

轧制复合过程中,金属表面的硬化层和氧化膜为界面结合的主要障碍<sup>[24]</sup>,当金属发生塑性变形时,待复合表面的硬化层或氧化层发生破裂,新鲜的金属从裂缝中挤出,并在轧制压力的作用下相互接触实现金属的有效结合。再结合断面扫描结果可以得出,钛、铝金属在轧制复合过程中钛侧表面产生裂纹,而铝金属具有良好的流动性,使得铝金属挤入钛侧表面的裂缝中,两种新鲜金属在压力和高温的作用下形成冶金结合。当压下量增大,钛侧表面的裂缝越大,挤入裂缝中的铝金属越多,从而界面结合强度越高。当两金属在结合界面形成充分的冶金结合时,由于铝金属抗拉强度低,在拉剪时会在钛

侧断面表面黏结大面积铝金属,此时的结合强度几乎等于铝基体的剪切强度。实验结果表明,钛/铝异温复合轧制可以使复合板达到很高的结合强度,并且使制备过程中两金属变形不协调的问题得到有效改善。

对压下率为30%及48%的样品进行了EBSD测试,其结果如图13(a)~(d)所示。当压下率为30%时,远离复合界面处的晶粒均为粒径65  $\mu\text{m}$ 以上的大晶粒,而靠近复合界面处的晶粒尺寸较小,粒径为0~40  $\mu\text{m}$ ,且不同尺寸的晶粒分布较为均匀,如图13(e)所示,界面附近晶粒细化是由轧制过程中复合界面在剪切力的作用下产生强烈的塑性变形、

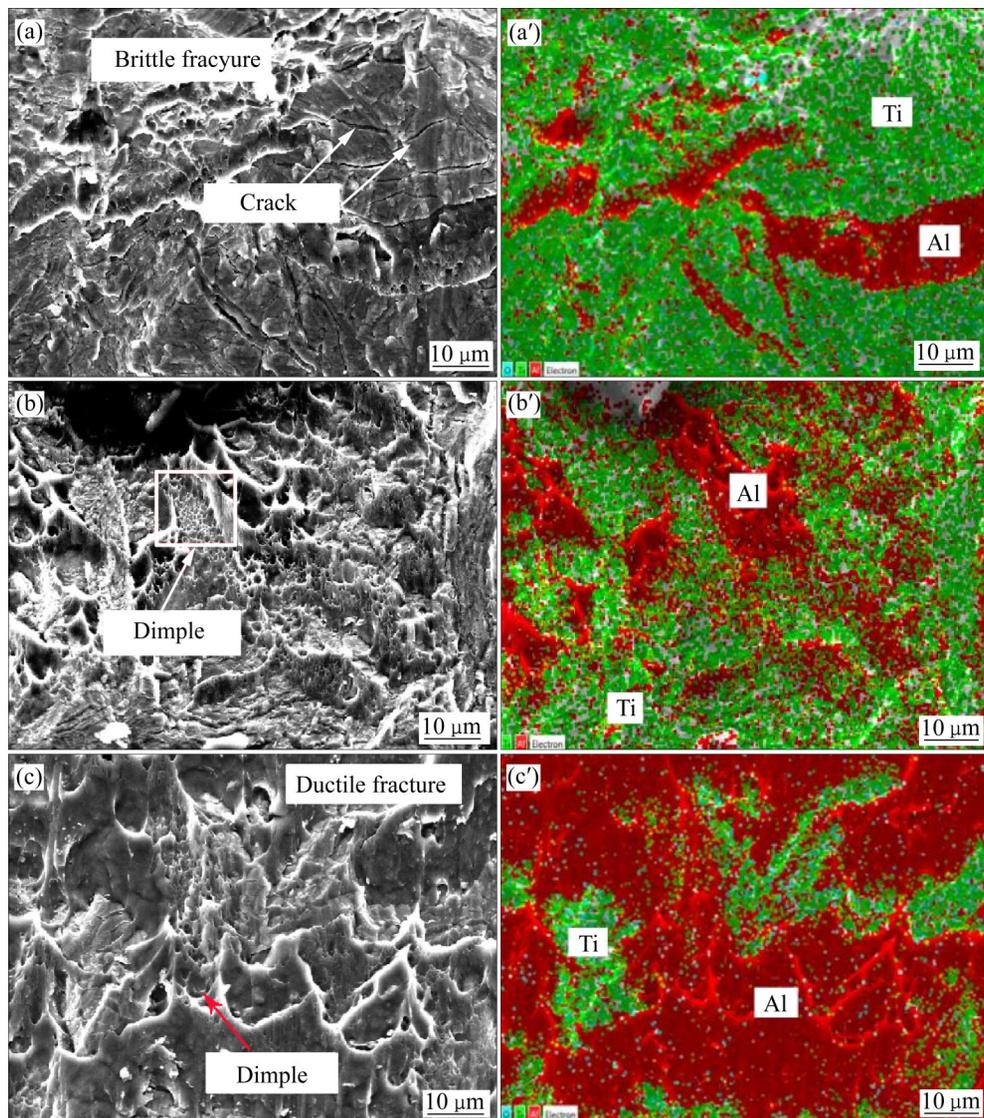


图12 钛侧断口的SEM像及对应的EDS面扫描分布

Fig. 12 SEM images((a), (b), (c)) and EDS surface element scanning distribution((a'), (b'), (c')) of titanium side fracture: (a), (a') 850  $^{\circ}\text{C}$ , 30% reduction; (b), (b') 850  $^{\circ}\text{C}$ , 40% reduction; (c), (c') 850  $^{\circ}\text{C}$ , 48% reduction

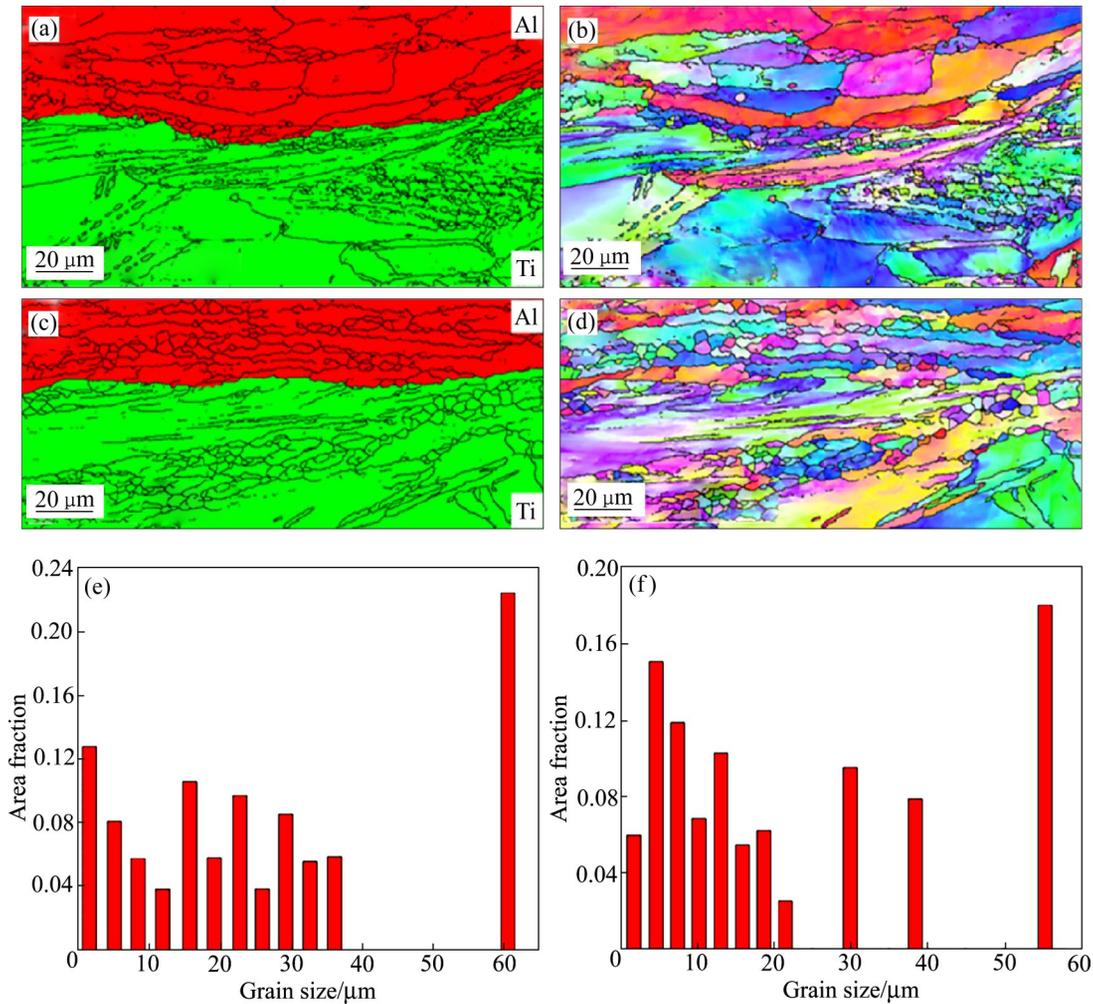


图 13 钛/铝复合界面两相分布EBSD 图像及界面晶粒尺寸分布

**Fig. 13** Phase distribution EBSD image and grain size distribution at interface of titanium/aluminum composite: (a) 850 °C, 30% reduction, phase distribution; (b) 850 °C, 48% reduction, phase distribution; (c) 850 °C, 30% reduction, EBSD; (d) 850 °C, 48% reduction, EBSD; (e) 850 °C, 30% reduction, grain size distribution; (f) 850 °C, 48% reduction, grain size distribution

界面处原始晶粒破碎而导致的, 随着与界面距离的增加, 基体受到的剪切作用力逐渐减弱, 因此晶粒尺寸大于界面处的晶粒尺寸<sup>[25]</sup>; 当压下率为 48% 时, 远离复合界面处的部分晶粒尺寸大小降低到了 30~40  $\mu\text{m}$ , 靠近复合界面处的晶粒尺寸大小为 0~20  $\mu\text{m}$  且大部分晶粒集中在 0~10  $\mu\text{m}$  内(见图 13(f)). 复合板整体晶粒尺寸发生明显细化, 这是由于压下率的增大, 产生的塑性变形增大, 导致组织中大量位错能的聚集, 高密度的位错通过严重的塑性变形为晶粒细化提供了强大的驱动力<sup>[26]</sup>, 促进了晶粒的动态再结晶, 同时应变的增大也使得变形储能提升, 进一步促进了晶粒的动态再结晶行为, 产生的

大量晶核会在晶界处生成再结晶晶粒, 使晶粒得到进一步的细化。细化的晶粒使得材料基体的力学性能得到了一定提升, 而剪切断裂有部分发生在基体处, 所以结合强度也得到相应提高。

## 4 结论

1) 通过电磁感应加热, 可以使组坯在一起的钛板、铝板形成 600 °C 以上的温度差, 且两层金属各自温度分布较为均匀, 从而构造出钛/铝协调变形轧制复合所需温度场。

2) 模拟与实验验证表明, 钛板与铝板的温度对

轧后复合板的结合强度与变形协调性能具有很大影响。当钛板加热温度为750~850℃、压下率在30%~48%范围内时,随钛板轧制温度升高和压下率的增加,钛板和铝板的变形协调性得到较大的改善。当钛板平均温度为850℃,压下率为48%时,复合板结合强度达到77 MPa。

3) 轧制过程中复合板结合界面处会产生氧化层,随着压下量的增大,钛金属表面产生的裂缝增大,更加有利于铝金属被挤入裂缝中,在压力和高温的作用下与新鲜钛金属形成牢固冶金结合。

## REFERENCES

- [1] YANG Yu, YU Yang, CHEN Rong, et al. A study on microstructural evolution and detwinning behavior of Ti-3Al-2.5V cold-rolled tube during annealing[J]. *Materials Research Express*, 2020, 7(9): 096520.
- [2] 金和喜,魏克湘,李建明,等.航空用钛合金研究进展[J].*中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 280-292.  
JIN He-xi, WEI Ke-xiang, LI Jian-ming, et al. Research progress of titanium alloys for aviation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(2): 280-292.
- [3] 刘宏,赵刚,刘春明,等.6000系铝合金组织性能的研究进展[J].*机械工程材料*, 2004, 28(6): 1-4.  
LIU Hong, ZHAO Gang, LIU Chun-ming, et al. Advances in research on microstructure and properties of 6000 series aluminium alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2004, 28(6): 1-4.
- [4] 黄华贵,刘禹彤,孙静娜,等.层厚比对钛/铝复合板拉伸力学性能的影响[J].*燕山大学学报*, 2019, 43(5): 394-400.  
HUANG Hua-gui, LIU Yu-tong, SUN Jing-na, et al. Effect of layer thickness ratio on tensile properties of Ti/Al clad plate[J]. *Journal of Yanshan University*, 2019, 43(5): 394-400.
- [5] 张婷,许浩,李仲杰,等.层状金属复合材料的发展历程及现状[J].*工程科学学报*, 2020, 43(1): 1-10.  
ZHANG Ting, XU Hao, LI Zhong-jie, et al. Development and status of laminated metal composites[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 43(1): 1-10.
- [6] 肖宏,许朋朋,祁梓宸,等.感应加热异温轧制制备钢/铝复合板[J].*金属学报*, 2020, 56(2): 231-239.  
XIAO Hong, XU Peng-peng, QI Zi-chen, et al. Preparation of steel/aluminum clad plate by induction heating and different temperature rolling[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(2): 231-239.
- [7] 徐圣航,周承商,刘咏.金属/金属层状结构复合材料研究进展[J].*中国有色金属学报*, 2019, 29(6): 1125-1142.  
XU Sheng-hang, ZHOU Cheng-shang, LIU Yong. Research progress of metal - metal layered structure composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(6): 1125-1142.
- [8] WANG Peng-ju, CHEN Ze-jun, HUANG Hong-tao, et al. Fabrication of Ti/Al/Mg laminated composites by hot roll bonding and their microstructures and mechanical properties[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 34(8): 192-201.
- [9] 刘环,郑晓冉.层状金属复合板制备技术[J].*材料导报*, 2012, 26(S2): 131-134, 149.  
LIU-Huan, ZHENG Xiao-ran. Preparation technology of laminated metal clad plate[J]. *Materials Reports*, 2012, 26(S2): 131-134, 149.
- [10] 范敏郁,郭训忠,崔圣强,等.钛/铝/钛三层板的一次爆炸复合[J].*稀有金属材料与工程*, 2017, 46(3): 770-776.  
FAN Min-yu, GUO Xun-zhong, CUI Sheng-qiang, et al. One-time explosive composite of Ti/Al/Ti tri-plate[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(3): 770-776.
- [11] 田广民,李选明,赵永庆,等.层状金属复合材料加工技术研究现状[J].*中国材料进展*, 2013, 32(11): 696-701.  
TIAN Guang-min, LI Xuan-ming, ZHAO Yong-qing, et al. Research status of processing technology of layered metal composites[J]. *Material China*, 2013, 32(11): 696-701.
- [12] 王文焱,史士钦,尚郑平,等.铸轧法制备钛铝复合板的界面组织与性能[J].*特种铸造及有色合金*, 2016, 36(10): 1084-1088.  
WANG Wen-yan, SHI Shi-qin, SHANG Zheng-ping, et al. Interfacial structure and properties of Ti-Al clad plates prepared by casting-rolling method[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloy*, 2016, 36(10): 1084-1088.
- [13] 刘朋柱.铸造法制备金属层状复合材料的发展及应用[J].*中国新技术新产品*, 2018(9): 52-53.  
LIU Peng-zhu. Development and application of metal layered composites prepared by casting[J]. *New Technology & New Products of China*, 2018(9): 52-53.
- [14] LIU Jin-xu, WU Hui-bin, YANG Shan-wu, et al. Effect of hot rolling reduction and annealing treatment on grain boundary character distribution in austenitic low-density Fe-Mn-Al-C-Cr steel[J]. *Materials Letters*, 2021, 285: 128999.
- [15] 李民权,张辉,李落星.热轧钢/铝复合板结合强度及界面的研究[J].*热加工工艺*, 2008, 37(24): 34-37, 41.  
LI Min-quan, ZHANG Hui, LI Luo-xing. Study on bonding

- strength and interface of hot rolled steel/aluminum composite plate[J]. *Hot Working Technology*, 2008, 37(24): 34-37, 41.
- [16] 祁梓宸, 余超, 肖宏, 等. 异温轧制制备钛/铝复合板的变形协调性与复合性能[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(6): 1120-1127.
- QI Zi-chen, YU Chao, XIAO Hong, et al. Deformation coordination and composite properties of Ti/Al clad plates prepared by rolling at different temperatures[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(6): 1120-1127.
- [17] LI M Q, JIANG F L, ZHANG H, et al. Deformation rule of steel/aluminum metal-laminate material during hot roll bonding[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19(4): 644-648.
- [18] 韩建超, 刘畅, 贾毅, 等. 钛/铝复合板研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(6): 1270-1280.
- HAN Jian-chao, LIU Chang, JIA Yi, et al. Research progress of Ti/Al clad plates[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(6): 1270-1280.
- [19] PENG L M, LI H, WANG J H. Processing and mechanical behavior of laminated titanium-titanium tri-aluminide (Ti-Al<sub>3</sub>Ti) composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 406(1): 309-318.
- [20] MA M, HUO P, LIU W C, et al. Microstructure and mechanical properties of Al/Ti/Al laminated composites prepared by roll bonding[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2015, 636: 301-310.
- [21] XIAO Hong, QI Zi-chen, YU Chao, et al. Preparation and properties for Ti/Al clad plates generated by differential temperature rolling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 285-290.
- [22] QI Zi-chen, XIAO Hong, YU Chao, et al. Preparation, microstructure and mechanical properties of CP-Ti/AA6061-Al laminated composites by differential temperature rolling with induction heating[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 44: 133-144.
- [23] LUKASCHKIN N D, BORISSOW A P. Interface surface behaviour in the upsetting of sandwich metal sheets[J]. *Journal of Materials Technology*, 1996, 61(3): 292-297.
- [24] BAY N. Mechanisms producing metallic bonds in cold welding[J]. *Welding Journal*, 1983, 62(5): 137-142.
- [25] 申宏卓, 刘元铭, 刘延啸, 等. Mg/Al复合板波纹轧模拟及变形区微观组织演变分析[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(22): 1-8.
- SHEN Hong-zhuo, LIU Yuan-ming, LIU Yan-xiao, et al. Simulation of corrugated rolling of Mg/Al composite plate and analysis of microstructure evolution in deformation zone [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(22): 1-8.
- [26] VAIDYANATH L R, NICHOLAS M G, MILNER D R. Pressure welding by rolling[J]. *British Welding Journal*, 1959, 13(6): 13-28.

## Finite element simulation and experiment of induction heating heterothermal rolling of Ti/Al composite plate

XIE Hong-biao, CHEN Nan, LIANG Shu-jie, YU Ji-rui, YU Chao, XIAO Hong

(National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling,  
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of uncoordinated deformation of Ti/Al in composite rolling, the experiments were implemented on the process of electromagnetic induction heating and rolling, titanium and aluminum were rolled and combined under the temperature difference above 600 °C, and the effects of plate temperature and reduction rate on deformation compatibility and bonding strength of Ti/Al composite plate were studied with finite element simulation. The results show that, when the heating temperature of titanium plate is 750–850 °C, the reduction rate is 30%–48%, the deformation coordination of titanium plate and aluminum plate greatly improves with the increase of heating temperature and reduction rate on titanium plate. When the temperature of titanium plate is 850 °C, the rolling reduction is 48%, the bonding strength of the composite plate reaches 77 MPa.

**Key words:** Ti/Al composite plate; induction heating; rolling compound; coordinate deformation; bonding strength

---

**Foundation item:** Projects(52075472, 52004242) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2018YFA0707300) supported by the National Key Research Development Program of China; Project(E2020203001) supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China

**Received date:** 2021-07-14; **Accepted date:** 2021-10-18

**Corresponding author:** YU Chao; Tel: +86-15232328011; E-mail: yuc@ysu.edu.cn

(编辑 龙怀中)